高强钢筋钢纤维混凝土框架中节点抗震性能试验研究

张健新[1,2],赵茜娅[1],丁传林[1,4],李润斌[3],张标[1]

(1. 河北工业大学土木与交通学院,300401 天津;2. 河北省土木工程技术研究中心,300401 天津;
3. 天津师范大学基建维修处,300387 天津;4 山东华鲁恒升化工股份有限公司,253024 德州)

chinaXiv:202303.00384v1

摘　要: 为研究配置高强钢筋梁柱节点抗震性能同时改善配置高强钢筋所引起的框架节点梁筋滑移量大的问题,在混凝土中加入钢纤维应用于节点的不同范围,对2个配置HRB600/HRB400钢筋的普通混凝土节点和2个配置HRB600钢筋的钢纤维混凝土节点进行低周反复荷载试验,探究钢筋强度、钢纤维范围对框架中节点抗震性能的影响。对比分析框架中节点的破坏特征,研究节点耗能能力、累积损伤、位移延性、梁筋滑移量等抗震性能指标。研究结果表明,所有试件均发生节点核心区剪切破坏,提高节点的梁钢筋等级能够显著提高节点的承载能力和耗能能力,但梁筋滑移量增加。在节点构件中采用钢纤维混凝土整体增强或局部增强均能够有效减少裂缝宽度和梁筋滑移,改善配置HRB600钢筋节点的破坏形态和滞回性能,提高耗能能力和延性性能,减轻累积损伤程度并减缓刚度退化。

关键词: HRB600钢筋;钢纤维混凝土;框架中节点;梁筋滑移;抗震性能

中图分类号: TU375　　**文献标志码:** A　　**DOI:** 10. 11776/j. issn. 1000-4939. 2022. 04. 012

Experimental research on seismic behavior of frame interior joints with high strength reinforcing bars and steel fiber concrete

ZHANG Jianxin[1,2], ZHAO Xiya[1], DING Chuanlin[1,4], LI Runbin[3], ZHANG Biao[1]

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, 300401 Tianjin, China;
2. Civil Engineering Technology Research Center of Hebei Province, 300401 Tianjin, China;
3. Infrastructure Maintenance Department, Tianjin Normal University, 300387 Tianjin, China;
4. Shandong Hualu-hengsheng Chemical Co., Ltd., 253024 Dezhou, China)

Abstract: This paper designs frame interior joints with overall or local steel fiber concrete to study th seismic performance of beam-column joints with high strength reinforcing bars and improve the large measured slip due to the usage of high strength reinforcing bars. Two normal concrete joins with HRB600/HRB400 reinforcing bars and two steel fiber concrete joins with HRB600 reinforcing bars were tested under reversed

收稿日期: 2021-11-24　　**修回日期:** 2022-01-09
基金项目: 河北省自然科学基金资助项目(No. E2021202012;E2019202064;E2018202290)
通信作者: 张健新,讲师。E-mail:zhangjianxin505@126. com.
引用格式: 张健新,赵茜娅,丁传林,等. 高强钢筋钢纤维混凝土框架中节点抗震性能试验研究[J]. 应用力学学报,2022,39(4):707-716.
ZHANG Jianxin, ZHAO Xiya, DING Chuanlin, et al. Experimental research on seismic behavior of frame interior joints with high strength reinforcing bars and steel fiber concrete[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2022, 39(4):707-716.

ChinaXiv合作期刊

cyclic loading. The failure characteristic, hysteretic curves of specimens were obtained. The energy dissipation, cumulative damage, displacement ductility, and slip of beam reinforcement were analyzed. The results showed that shear failure of the connection core occurred in all joint specimens. The bearing capacity and energy dissipation capacity were improved by enhancing the reinforcement bar grade, whereas the measured slip of beam reinforcement increased. The crack width and slip of beam reinforcement in specimens with overall or local steel fiber concrete were effectively reduce. The failure mode, hysteretic behavior, energy dissipation capacity and ductility were improved and the cumulative damage and stiffness degradation were alleviated.

Key words: HRB600 reinforcing bar; steel fiber concrete; frame interior joint; beam reinforcement slip; seismic behavior

chinaXiv:202303.03638v1

梁柱节点作为梁柱连接区域的主要构件,承受平面框架内来自周边区域的弯矩、剪力和轴力,对结构的整体性和稳定性有重要影响[1-2]。在地震作用下,节点核心区往往发生剪切破坏导致结构破坏,并且破坏后难以修复[3-5],学者们针对梁柱节点进行了大量研究[6-7]。高强钢筋作为一种高效、经济的新型钢筋,可以节省造价并且减少钢材的使用,配置高强钢筋能使构件的安全储备得到提高[8-9]。文献[10]对6个配置500 MPa纵筋的钢筋混凝土顶层框架端节点进行了低周反复加载试验,得出当剪压比超过0.25时,配置500 MPa钢筋的节点试件的抗震性能将会下降。文献[11]对21个钢筋混凝土框架中间层中节点进行了拟静力试验,分析不同受力情况、材料强度、相对长度等因素对节点段梁筋黏结退化情况的影响,并得出不同阶段黏结应力计算公式。文献[12]对采用700 MPa梁柱纵筋的5个全尺寸钢筋混凝土梁柱边节点进行了低周往复加载试验,发现所有构件梁纵筋均达到受弯屈服,在层间位移角大于2%时,采用高强度等级的梁纵筋会导致梁上部纵筋黏结强度下降,进一步增加节点梁纵筋的滑移。类似地,文献[13]对配置600 MPa高强钢筋的4个中节点和3个边节点进行了低周往复加载试验,发现高强钢筋的使用增加了底部梁筋的黏结滑移,致使耗能能力大幅下降。文献[14]通过ABAQUS软件采用分离式建模的方法建立了高强钢筋梁柱节点的有限元模型,考虑混凝土损伤塑性模型参数对高强钢筋梁柱节点梁纵筋黏结滑移的影响,发现配置高强钢筋的混凝土节点梁筋滑移量增大。

梁柱节点中配置高强钢筋可以有效减轻节点区域钢筋拥堵,但采用高强钢筋又会诱发黏结强度降低和滑移量大的问题[15-16]。为解决这一问题,学者将纤维类混凝土代替普通混凝土加入到构件中,在一定程度上克服了普通混凝土黏结性能差、抗拉强度低等缺点,同时在节点区域加入纤维材料能够减少箍筋的用量,改善节点薄弱问题[17-18]。文献[19]采用ABAQUS建立了边节点和中节点的三维有限元分析模型,旨在评估不同钢纤维掺入比加入对钢筋混凝土节点的影响。通过对模型节点进行低周往复加载,发现钢纤维的加入能够有效控制裂缝发展,增强节点的强度、延性和耗能能力。文献[20]探究了纤维增强混凝土梁柱节点在拟静力试验方法下的力学性能,研究发现随着轴压比的增加,纤维增强混凝土梁柱节点的受剪承载力、侧向变形能力、耗能能力及节点核心区的剪切强度和剪切变形能力得到增加,同时探究了钢纤维掺加范围对梁柱中节点抗震性能的影响,发现采用纤维混凝土的构件具有很高的承载能力和耗能能力,并给出了建议采用纤维混凝土的范围[21]。采用纤维类混凝土可以增加其与钢筋的黏结性能,有效控制裂缝,但以上研究未涉及纤维类混凝土与HRB600高强钢筋相结合对节点性能的影响。

因此,为充分发挥高强钢筋和钢纤维混凝土的优势,本研究对掺入钢纤维混凝土的高强钢筋混凝土梁柱节点进行低周反复荷载试验,对其滞回特性、累积损伤、位移延性以及梁筋滑移等指标进行研究,研究结果将为高强钢筋钢纤维混凝土框架结构的研究提供参考并为梁柱节点抗震设计提供有效的解决方案。

1 构件设计及加载方案

试验设计4个混凝土框架中节点试件,梁、柱截面尺寸分别为250 mm × 400 mm和350 mm × 350 mm,柱边长不等于梁宽,梁纵筋保护层和柱纵

筋的保护层均为 25 mm。其中，普通混凝土和 HRB600 级高强钢筋所构成的中节点试件为 ZJ1，普通混凝土和 HRB400 级钢筋的对照试件被命名为 ZJ2，试件 ZJ3 是采用高强钢筋混凝土中节点试件，整个构件均掺入体积百分含量为 1.2% 的钢纤维，试件 ZJ4 为节点核心区以及梁端局部加入钢纤维的高强钢筋混凝土中节点试件，其中，钢纤维体积掺入量也为 1.2%，钢纤维的长度为 30 mm，其长径比即钢纤维长度与直径的比值为 60，测得钢纤维抗拉强度约为 1 000 MPa，考虑梁端塑性铰区的范围，根据有效梁高确定钢纤维混凝土向梁内延伸 350 mm，即一倍有效梁高。试件的几何尺寸及钢筋配置情况如图 1 所示(图中 HRB600 钢筋用字母 E 表示)。ZJ1、ZJ2 和 ZJ3 的梁配筋率为 1.08%，ZJ4 的配筋率为 0.76%，在适筋梁范围内。ZJ3 和 ZJ4 的纵筋配置不同是为了研究剪压比的影响，从而使 ZJ2 和 ZJ4 两者剪压比相差不多，使 ZJ2 和 ZJ4 形成新的对照组，以用来研究配置不同纵筋等级对节点抗震性能的影响。节点试件的具体设计参数见表 1。上述节点试件所采用的普通混凝土强度等级为 C55，测得普通混凝土和钢纤维混凝土试件立方体抗压强度平均值分别为 55.6 MPa 和 57.3 MPa。为研究纵筋采用 HRB600 时，节点梁筋的黏结滑移现象，设计的柱截面尺寸与梁纵筋直径之比为 19.5，略小于现行《混凝土结构设计规范》GB 50010 – 2010 规定的限值 20。试件的试验轴压比等于轴压力 N 除以混凝土轴心抗压强度 f_c 再除以节点核心区验算截面柱全截面面积 $b_j h_j$，按式(1)计算[22]；剪压比为截面平均剪应力 $V_j/b_j h_j$ 与混凝土轴心抗压强度设计值 f_c 之比，按式(2)计算[23]。

$$\mu = \frac{N}{f_c b_j h_j} \tag{1}$$

$$\gamma = \frac{V_j}{f_c b_j h_j} \tag{2}$$

节点核心区和局部增强部分钢纤维混凝土浇筑时，用木模板将该范围隔开(图 1e)，同时浇筑这个部位钢纤维混凝土和其他部位的普通混凝土，待振捣后，撤掉分隔的木模板，然后进行二次振捣。其中，同时浇筑和振捣的目的是保证两种混凝土的可靠黏结。

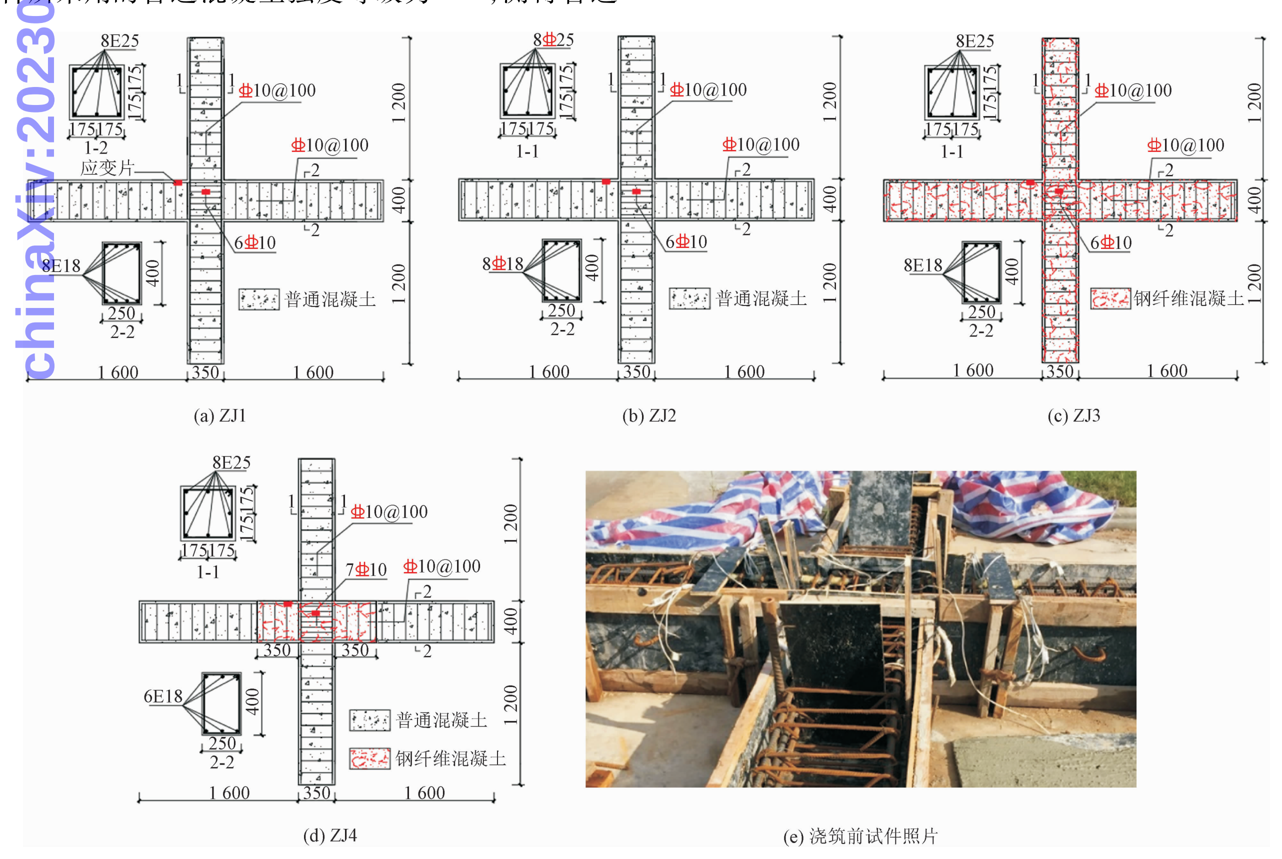


图 1 试件详情

Fig. 1 Specimen details

chinaXiv:202303.03038v1

ChinaXiv合作期刊

表 1　试件设计参数

Tab. 1　Specimen design parameters

构件	纵筋强度等级	箍筋强度等级	节点箍筋	γ	μ	混凝土类型
ZJ1	HRB600	HRB400	6 ⌀ 10	0.273	0.15	普通混凝土
ZJ2	HRB400	HRB400	6 ⌀ 10	0.189	0.15	普通混凝土
ZJ3	HRB600	HRB400	6 ⌀ 10	0.273	0.15	整体钢纤维混凝土
ZJ4	HRB600	HRB400	7 ⌀ 10	0.205	0.15	局部钢纤维混凝土

除试件 ZJ2 配置 HRB400 梁柱纵筋外,其余试件 ZJ1、ZJ3 和 ZJ4 均采用 HRB600 级高强钢筋,所有节点试件的箍筋为 HRB400 钢筋,钢筋材性试验结果见表 2。

试件加工制作完成后,对其进行低周往复加载试验,试验加载装置如图 2 所示。根据《建筑抗震试验规程》(JGJ/T 101 –2015)规定,本试验加载制度采用先力后位移的混合加载方式,试验加卸载过程如图 3 所示。首先,在柱顶施加 505 kN 轴压力,对应轴压比为 0.15。试件屈服前采用力控制,每级循环一次;试验过程中观察梁纵筋应变,当达到屈服应变时,转变为位移控制,每级循环三次,直到试验荷载降低到峰值荷载 85% 以下,试验结束。

表 2　钢筋性能

Tab. 2　Material properties of reinforcing bars

钢筋等级	钢筋直径/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	弹性模量/GPa
HRB400	10	467.08	662.42	218
HRB400	18	471.81	623.18	226
HRB400	25	507.68	645.82	219
HRB600	18	615.47	785.04	212
HRB600	25	619.76	784.03	223

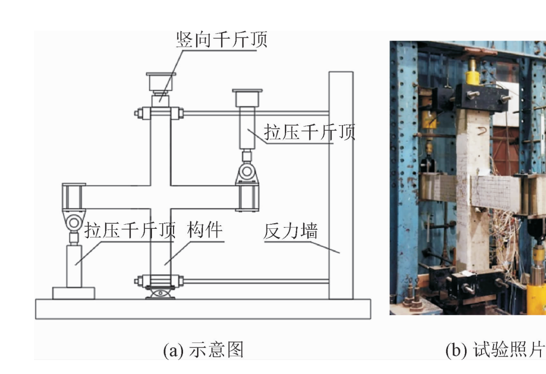


图 2　试验加载装置

Fig. 2　Test setup

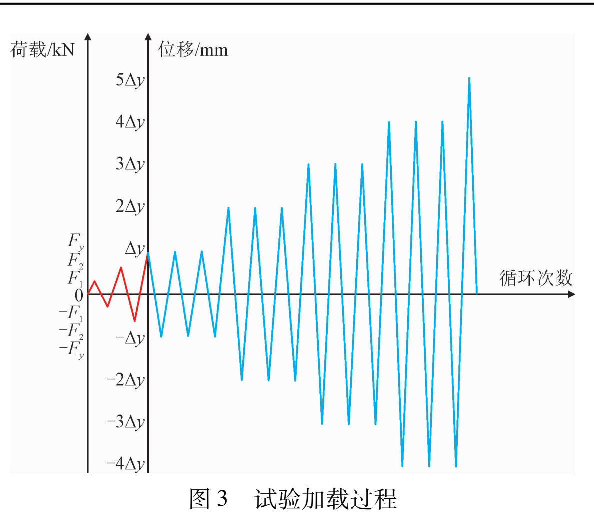


图 3　试验加载过程

Fig. 3　Loading history

2　裂缝开展情况及破坏形态

各试件最终裂缝开展及破坏特征如图 4 所示。

对比各试件的破坏特征可以发现:梁端加载至 100 kN 时,梁端底部开始出现竖向弯曲裂缝,节点核心区出现斜向剪切裂缝。加载至 120 kN 时,梁端出现贯穿裂缝,这主要是由于梁上端和梁下端竖向弯曲裂缝不断发展交汇形成,节点核心区随着正反向荷载交替形成交叉裂缝。在试验结束后,所有试件均呈现节点核心区剪切破坏,配置 HRB600 钢筋的普通混凝土试件 ZJ1 和对照试件 ZJ2 的节点核心区出现大量混凝土脱落,箍筋几乎全部外露。高强度钢筋的使用使 ZJ1 节点核心区混凝土脱落比 ZJ2 更为严重,破坏程度更加明显。同时,配置高强钢筋混凝土试件 ZJ1 的剪压比比试件 ZJ2 高大约 44.4%,试件 ZJ1 由于采用了高强钢筋,试件的承载能力增加约 40%,这在很大程度上加重了节点的剪切破坏程度。对比普通混凝土试件 ZJ1、ZJ2 和钢纤维增强混凝土试件 ZJ3 和 ZJ4,钢纤维增强的节点裂缝数量多,宽度较小,且节点核心区没有明显的混凝土脱落,表明钢纤维的加入能够有效控制裂缝发展并显著减轻节点混凝土保护层剥落。

chinaXiv:202303.03084v1

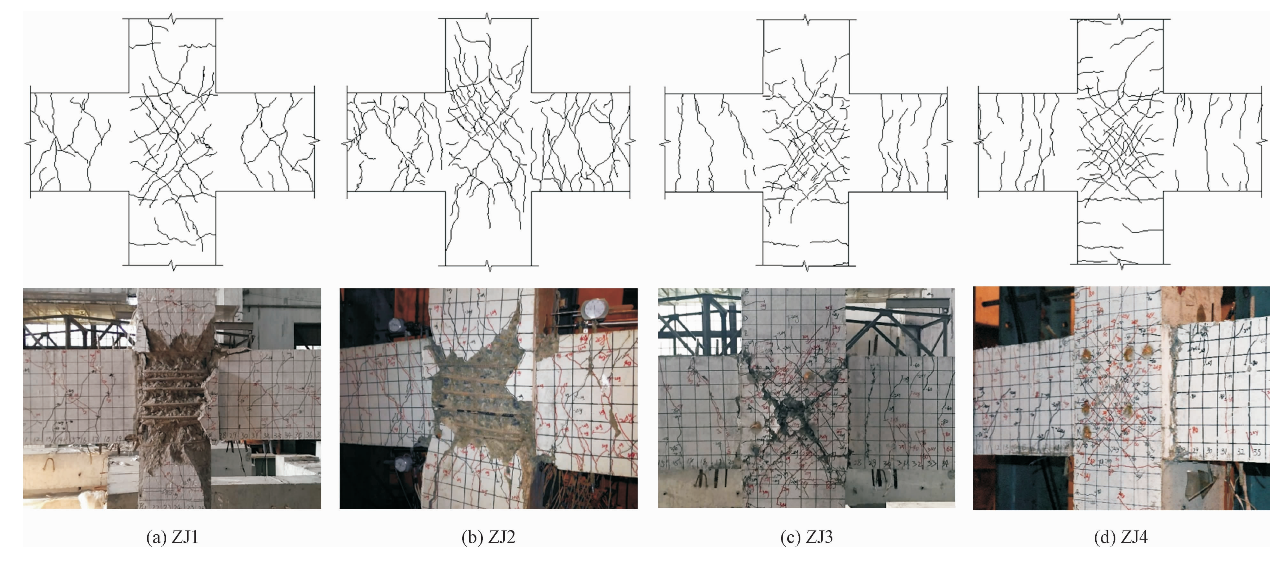


图 4　各试件破坏特征

Fig. 4　Failure characteristics of specimens

chinaXiv:202303.00384v1

对比整体钢纤维增强试件 ZJ3 和局部(节点核心区以及梁端)采用钢纤维增强试件 ZJ4，两者裂缝开展过程及分布规律基本相同，破坏时节点核心区混凝土轻微脱落，整体采用钢纤维混凝土的高强钢筋试件 ZJ3 的剪压比比局部采用钢纤维混凝土的试件 ZJ4 的大约 33.2%，承载力高约 8%。因此，试件 ZJ3 的节点核心区最终出现一条明显的交叉裂缝，混凝土沿此裂缝发生脱落，程度比试件 ZJ4 的严重。增加试件的剪压比使试件 ZJ3 节点核心区破坏更严重，核心区主斜裂缝宽度增大，表明增加剪压比对节点的破坏模式不利。因为 ZJ1 试件和 ZJ3 试件的剪压比相同，由于整体掺加钢纤维使 ZJ3 试件的破坏位移提高 54.7%，且 ZJ1 试件混凝土保护层脱落严重，加载结束时节点核心区箍筋外露严重。ZJ3 试件与 ZJ4 试件的破坏形态差异不大，ZJ4 试件的破坏位移仅比 ZJ3 试件大 0.8%，也有文献[24]研究发现，不同掺加钢纤维范围对破坏位移和破坏形态影响不大，由此可以推断控制了节点的破坏形态，试件将具有良好的变形能力，剪压比小的构件对节点的破坏形态很有利。

节点核心区受力复杂，处于多重受力状态下，梁端及柱端受压区混凝土压力、节点核心区混凝土斜向压力、梁端及柱端纵筋拉力、箍筋以及贯穿节点段梁纵筋与混凝土间的黏结力、柱端剪力、梁纵筋的销栓作用以及裂缝间骨料的咬合力等都对抵抗节点剪力产生了重要影响。而对于钢纤维混凝土增强的节点，其抗剪贡献还包括裂缝间钢纤维桥接作用、斜裂缝截面钢纤维及节点核心区受压区混凝土的作用，这在一定程度上体现了钢纤维的阻裂增强机理，能够增加钢纤维混凝土与高强钢筋之间的黏结作用，从而增加黏结强度并减小钢筋的滑移量。

3　试验结果分析及讨论

3.1　滞回曲线

上述节点的滞回曲线如图 5 所示，其中横坐标为加载点处位移变化情况，纵坐标表示加载点处施加的力，综合说明节点核心区剪切变形和梁端塑性铰区的变形[12,20]。

图 5 中各试件的滞回曲线在加载正负方向上基本对称。在加载初期，滞回曲线呈线性变化，滞回环呈梭形面积几乎为零。随着加载过程的持续，试件进入弹塑性发展阶段，滞回曲线逐渐倾斜呈现非线性变化，滞回环变得饱满，节点耗能增加。

对比试件 ZJ1 和 ZJ2 可知，随着节点试件剪压比的增加，配置 HRB600 钢筋的普通混凝土试件 ZJ1 滞回曲线更加饱满，滞回环循环次数减少，承载能力和变形能力显著提高。与高强钢筋混凝土试件 ZJ1 相比，整体采用钢纤维混凝土的高强钢筋试件 ZJ3 和局部采用钢纤维混凝土的试件 ZJ4 滞回环循环次数增加，刚度退化缓慢，加载后期承载力下降平缓。对比剪压比相同的试件 ZJ1 和 ZJ3，整体采用钢纤维混凝土试件 ZJ3 极限承载力略有下降，变形能力得到提高。对比试件 ZJ3 和 ZJ4 可知，随着节点试件剪压比的增加，高强钢筋钢纤维混凝土试件 ZJ3 滞

ChinaXiv合作期刊

回曲线更加饱满,极限承载力和变形能力更大。综上可知,试件 ZJ3 具有较好的滞回能力。

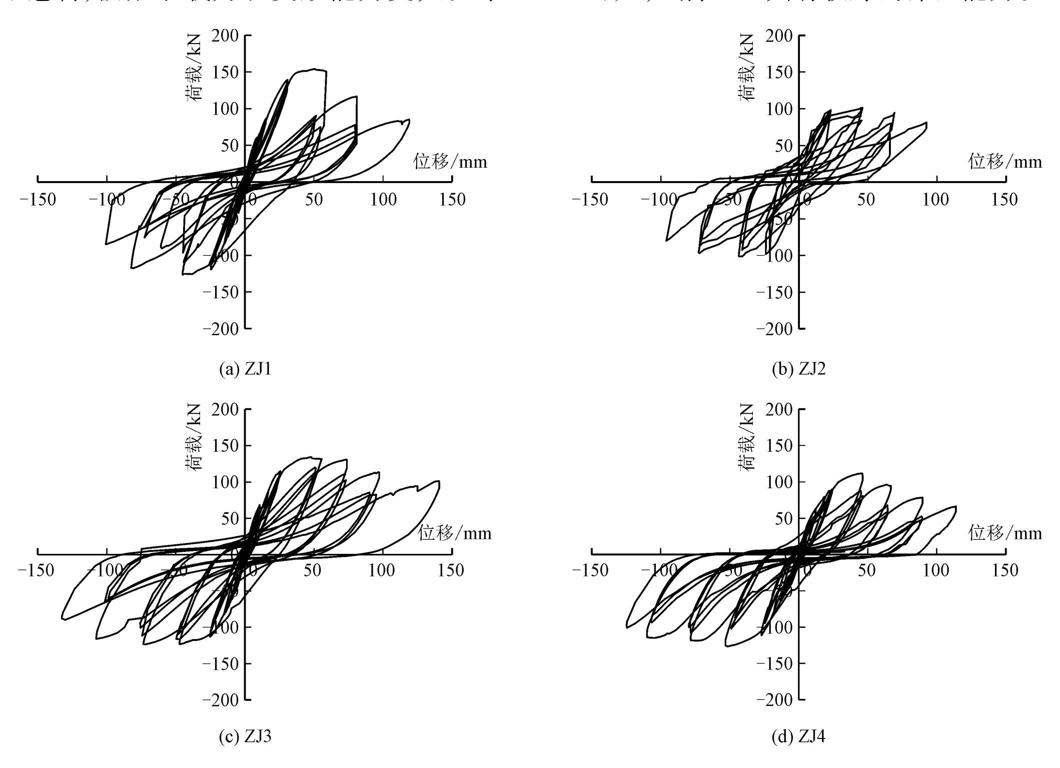


图 5 各试件滞回曲线

Fig. 5 Hysteretic curves of specimens

3.2 耗能能力

累积耗能是评价结构或构件耗能能力的重要指标[25]。每个滞回环的面积代表该加载循环下的能量耗散,将该加载时刻之前的所有滞回面积相加可以得到累积耗能。采用加载点处的位移绘制的耗能曲线综合说明节点核心区剪切变形和梁端塑性铰区的变形引起的耗能[26],绘制得到各试件加载点处的耗能曲线如图 6 所示。

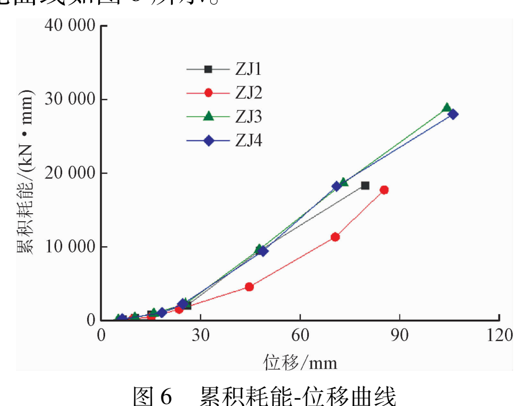


图 6 累积耗能-位移曲线

Fig. 6 Cumulative energy dissipation versus displacement curve

由图 6 可知,加载初期,各节点试件累积耗能基本相同,滞回曲线基本重合呈线性增长趋势,未产生不可恢复变形,试件处于弹性阶段。在达到同一位移时,试件 ZJ1、ZJ3 和 ZJ4 的累积耗能均明显高于普通钢筋混凝土试件 ZJ2,表明提高钢筋强度以及采用钢纤维混凝土能显著提高构件的耗能能力,有利于结构抗震。对比试件 ZJ1、ZJ3 和 ZJ4 可以发现,在加载前期,三者的累积耗能-位移曲线基本重合,在中后期,钢纤维混凝土增强的试件 ZJ3 和 ZJ4 具有更高的耗能能力和变形能力。同时,整体采用钢纤维混凝土的高强钢筋试件 ZJ3 和局部采用钢纤维混凝土的试件 ZJ4 的累积耗能-位移曲线变化规律基本一致。

3.3 刚度退化

各试件的刚度退化曲线如图 7 所示。从图 7 可知,试件 JZ1 的刚度退化率明显低于其他 3 个节点,且 ZJ2、ZJ3 和 ZJ4 试件刚度退化曲线更平缓,且具有更好的变形能力。对比试件 ZJ1、ZJ3 和 ZJ4 可以发现,整体采用钢纤维混凝土的高强钢筋试件 ZJ3 和局部采用钢纤维混凝土的试件 ZJ4 的刚度退化得到显著改善,这主要是由于钢纤维的加入,限制了裂缝的开展。对比中节点试件 ZJ3 和 ZJ4 可知,在加载初期,两者刚度退化曲线基本重合,在加载中后

chinaXiv:202303.00384v1

期,局部采用钢纤维混凝土的试件 ZJ4 的刚度退化较为缓慢,这主要是因为试件 ZJ4 的剪压比较小,节点的承载能力较小,破坏程度小,表明较小的剪压比能够有效改善中节点试件的刚度退化情况。

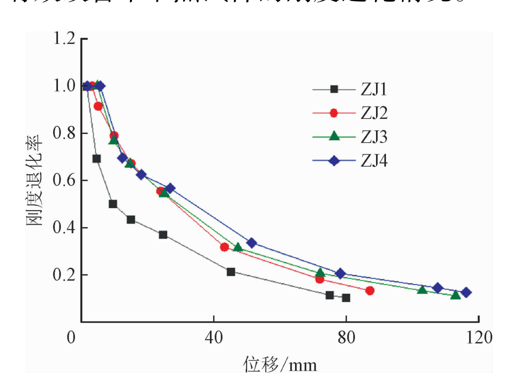


图 7 各试件刚度退化曲线

Fig. 7 Stiffness degradation curve of specimens

3.4 累积损伤

累积损伤是研究节点抗震性能的重要指标,主要通过累积损伤指标 D_{ey} 来反映[19]。根据外力做功以及能量守恒定律,D_{ey} 可以由以下公式得出[27],公式中面积见图 8 阴影所示。

$$D_{ey}=\frac{S_{ABOCDO}-S_{OEFGHL}-S_{BEF}-S_{DHL}}{S_{ABOCDO}} \tag{3}$$

各中节点试件在不同破坏阶段的累积损伤指标见表 3 所示。

表 3 累积损伤指标

Tab. 3 Cumulative damage indexes

构件	初裂	屈服	极限	破坏
ZJ1	0.336	0.774	0.815	0.926
ZJ2	0.284	0.656	0.836	0.912
ZJ3	0.295	0.652	0.791	0.906
ZJ4	0.242	0.617	0.801	0.884

由表 3 可知,在初裂、屈服和破坏阶段,试件 ZJ1 的累积损伤指标最大,这主要是由于过大的剪压比造成的,因此在对普通混凝土节点进行设计时,不宜采用过高的剪压比。在初裂、屈服、极限和破坏阶段,与试件 ZJ1 相比,试件 ZJ3 的 D_{ey} 值分别降低 12%、16%、3% 和 2%,试件 ZJ4 的 D_{ey} 值分别降低 28%、20%、2% 和 5%,可见钢纤维混凝土的使用对缓解梁柱中节点试件的累积损伤程度是十分有效的。

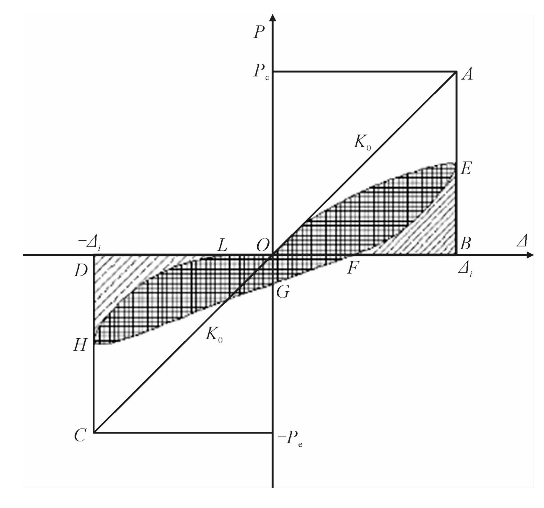


图 8 累积损伤指标计算

Fig. 8 Calculation of cumulative damage indexes

3.5 位移延性和承载力

加载过程中,各试件在不同方向的极限荷载、受剪承载力、不同阶段的位移情况及延性系数如表 4 所示。其中,开裂位移指节点试件出现第一条裂缝时的位移,中节点在屈服极限处的位移为屈服位移,采用等面积法确定[28],当试件承载力下降至极限荷载的 85% 时对应的位移为破坏位移。延性系数等于破坏位移与屈服位移的比值[29]。节点核心区受剪承载力为

$$V_{jh}=\frac{\sum M_b}{h_{b0}-a_s'}\left(1-\frac{h_{b0}-a_s'}{H_c-h_b}\right) \tag{4}$$

式中:M_b 为节点核心区所承受的弯矩,其计算方法为梁端荷载乘以其到节点核心区边缘的距离;h_{b0} 为梁截面有效高度;a_s' 为梁纵向受压钢筋合力点至截面近边的距离;H_c 为节点的柱高度;h_b 为梁的长度。

加入钢纤维混凝土增强的试件 ZJ3 和 ZJ4 的平均极限荷载和受剪承载力比高强钢筋混凝土试件 ZJ1 分别降低了 8.1% 和 14.8%,同时其滑移量有所降低(表 5),同时对比采用整体钢纤维混凝土增强的 ZJ3 和局部钢纤维混凝土增强的 ZJ4 可以发现前者的平均受剪承载力比后者的平均受剪承载力提高了 7.9%,由此可见在混凝土中加入钢纤维不能提升节点核心区的受剪承载力。采用高强钢筋的节点 ZJ1 的平均极限荷载和受剪承载力比普通钢筋节点 ZJ2 分别增加了 38.43 kN 和 312.48 kN,增幅比例均为 37.9%,同时梁纵筋的滑移量增加了 45.4%(表 5),可见高强钢筋可以显著提高节点的受剪承载力,但钢筋滑移现象较为严重。

chinaXiv:202303.00384v1

ChinaXiv合作期刊

表 4　各试件承载力、位移及延性系数

Tab. 4　Load capacity, displacement and ductility factor of specimens

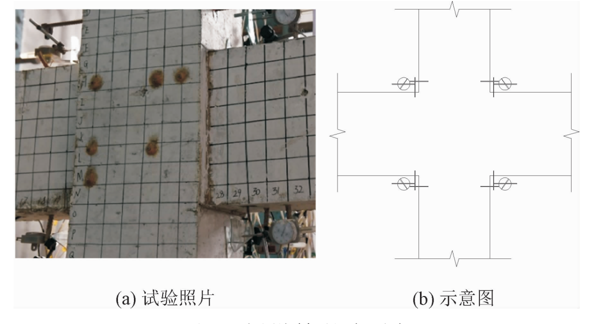
构件	加载方向	极限荷载/kN	受剪承载力/kN	开裂位移/mm	屈服位移/mm	破坏位移 /mm	延性系数
ZJ1	正向	154.03	1 252.44	10.74	30.87	79.15	2.56
	负向	125.58	1 021.11	9.50	22.73	79.81	3.51
ZJ2	正向	101.31	823.77	9.50	23.60	83.55	3.54
	负向	101.44	824.82	9.94	24.51	87.17	3.56
ZJ3	正向	134.11	1 090.47	10.50	28.81	95.55	3.32
	负向	122.96	999.81	9.88	24.65	113.02	4.58
ZJ4	正向	111.59	907.36	12.25	26.38	90.72	3.44
	负向	126.62	1 029.57	12.50	25.90	116.20	4.49

对比分析各试件的位移和延性系数可以看出，所有试件的延性系数平均值均达到 3，表明所有试件均具有较好的变形能力。ZJ1 出现裂缝时的位移和钢筋屈服时的位移的平均值比试件 ZJ2 分别提高了 4% 和 11%，但破坏位移和延性系数平均值分别降低了 7% 和 15%，这主要是采用高强钢筋提高了节点的整体刚度，提高剪压比降低了节点的破坏位移，从而降低了延性。与高强钢筋混凝土试件 ZJ1 相比，钢纤维增强的试件 ZJ3 和 ZJ4 破坏位移平均值分别提高了 31% 和 30%，延性系数平均值分别提高了 30% 和 31%，表明加入钢纤维能显著提高试件的变形能力和延性性能。试件 ZJ3 和 ZJ4 的位移和延性系数平均值相差不大，在节点局部加入钢纤维与全部采用钢纤维混凝土对构件的变形能力和延性性能影响不大。

ChinaXiv:202303.00084v1

3.6　梁筋实测滑移量

为测量梁纵筋相对于梁柱交界面的滑移量，混凝土浇筑前在距离柱边 5 cm 处将一根短钢筋焊接于梁纵筋上，短钢筋上放置塑料泡沫，以保证短钢筋可以在水平方向自由移动。试验前将泡沫掏出，然后打磨短钢筋并粘贴玻璃片，把百分表固定测量相对滑移量[30]，测量方法及应变片位置见图 9。测得滑移量如表 5 所示。



(a) 试验照片　　(b) 示意图

图 9　梁纵筋滑移测点

Fig. 9　Slip measurement of beam longitudinal bar

表 5　梁筋滑移量

Tab. 5　Measured slip of beam reinforcements

构件	滑移方式	屈服滑移量/mm	极限滑移量/mm	破坏滑移量/mm
ZJ1	滑入	3.28	10.77	21.69
	滑出	1.92	3.51	11.35
ZJ2	滑入	5.01	8.99	14.94
	滑出	1.95	3.44	7.79
ZJ3	滑入	2.82	8.12	18.29
	滑出	2.06	5.16	11.12
ZJ4	滑入	2.02	7.10	18.82
	滑出	1.10	2.31	9.22

由表 5 可知，与普通钢筋混凝土节点试件 ZJ2 相比，高强钢筋混凝土节点试件 ZJ1 在加载初期的滑入和滑出量均得到减少，但在加载后期滑入和滑出量均增加，这是由于 ZJ1 节点破坏时所受剪力较大，损伤较为严重，导致梁筋黏结退化加重。采用钢纤维混凝土的试件 ZJ3 和 ZJ4 在破坏时梁筋滑出量分别比采用普通混凝土试件的 ZJ1 减少 0. 23 和 2. 13，说明钢纤维混凝土与高强钢筋能够能够有效的协同工作，进而减少钢筋滑移量。与高强钢筋钢纤维混凝土试件 ZJ3 相比，局部加入钢纤维的高强钢筋混凝土试件 ZJ4 破坏时的滑入和滑出量有所减少，这主要是由于节点 ZJ4 的剪压比较小，破坏时承受的剪力较小，破坏程度较轻，因此梁筋滑移量较小。

3.7　钢筋应变

梁纵筋和节点核心区箍筋的应变-位移曲线如图 10 所示，梁筋和箍筋应变片布置如图 1 所示。从曲线中可以看出，节点核心区破坏时，梁纵筋和箍筋均超过屈服应变，未增强的节点试件由于梁纵筋滑

移均出现梁端混凝土压碎,钢纤维增强的节点梁端几乎没有混凝土压碎现象。

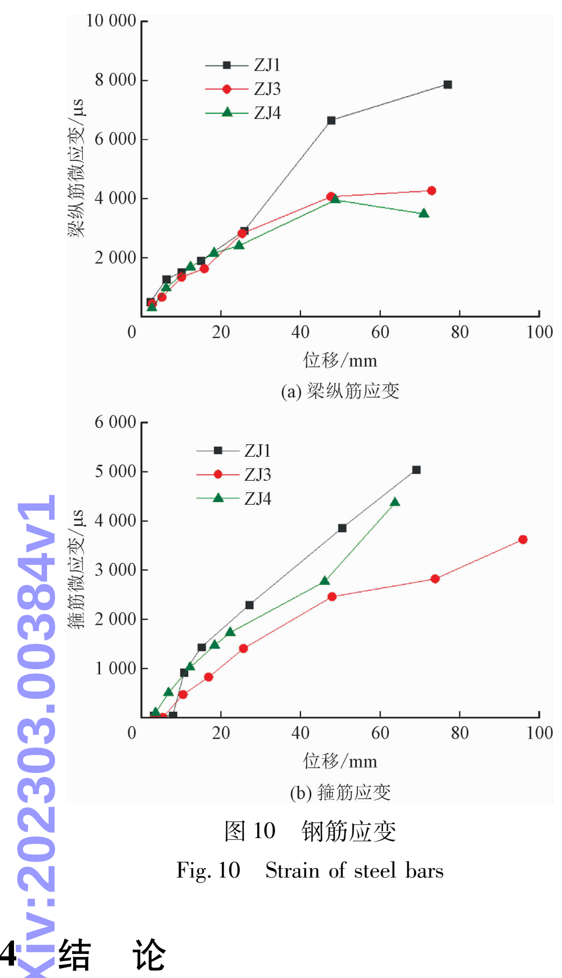


图 10　钢筋应变

Fig. 10　Strain of steel bars

chinaXiv:202303.00384v1

4 结　论

1)经过拟静力试验循环加载,所有中节点试件在节点核心区均出现剪切破坏。采用高强钢筋混凝土试件的剪压比是配置普通钢筋混凝土节点的1.44倍,加重了节点的剪切破坏程度。对比试件ZJ1和ZJ3,后者由于钢纤维的加入能够有效减缓节点核心区裂缝扩展,改善混凝土脱落情况。

2)提高节点的梁钢筋等级,能够显著提高节点的承载能力和耗能能力,但梁筋滑移量增加。在配置HRB600钢筋节点构件中采用钢纤维混凝土整体增强或局部增强均能够有效减少裂缝宽度和梁筋滑移,改善节点的破坏形态和滞回曲线,提高节点的耗能能力和延性性能,减缓刚度退化和减轻累积损伤程度。

3)在高强钢筋混凝土中节点中加入钢纤维,能够保证二者更好地协同工作,钢纤维的加入增加了节点延性和耗能能力。整体或局部采用钢纤维对节点试件进行增强,均表现出较好的抗震性能,且两者差异不大。综合考虑破坏模式和施工方便性,整体采用钢纤维增强的措施对节点性能较为有利。

参考文献:

[1] SHEN Xinyu, LI Bo, CHEN Y T, et al. Seismic performance of reinforced concrete interior beam-column joints with novel reinforcement detail[J]. Engineering structures, 2021, 227(15): 111408.

[2] CHETCHOTISAK P, ARJSRI E, TEERAWONG J. Strut-and-tie model for shear strength prediction of RC exterior beam-column joints under seismic loading[J]. Bulletin of earthquake engineering, 2020, 18(4): 1525-1546.

[3] 王亚勇. 汶川地震建筑震害启示——抗震概念设计[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(4): 20-25.
WANG Yayong. Lessons learnt form building damages in the Wenchuan earthquake – seismic concrete design of buildings[J]. Journal of building structures, 2008, 29(4): 20-25 (in Chinese).

[4] MITCHELL D, DEVALL R H, SAATCIOGLU M, et al. Damage to concrete structures due to the 1994 Northridge earthquake[J]. Revue canadienne de génie civil, 1995, 22(2): 361-377.

[5] SAYEDMANDI A D, MOSTOFINEJAD D, ALAEE P. Effects of high-strength reinforcing bars and concrete on seismic behavior of rc beam-column joints[J]. Engineering structures, 2019, 183(15): 702-719.

[6] YANG Hong, ZHAO Wentong, ZHU Zhenzhen, et al. Seismic behavior comparison of reinforced concrete interior beam-column joints based on different loading methods[J]. Engineering structures, 2018, 166(1): 31-45.

[7] NOURI A, SAGHAFI M H, GOLAFSHAR A. Evaluation of beam-column joints made of HPFRCC composites to reduce transverse reinforcements[J]. Engineering structures, 2019, 201(15): 109826.

[8] 伍云天,付俊杰,李鑫,等. 不同设防烈度下配置高强度钢筋的混凝土框架结构非线性动力反应分析[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(增刊2): 84-91.
WU Yuntian, FU Junjie, LI Xin, et al. Nonlinear dynamic response of frame structures reinforced with high strength reinforcements under different seismic fortification intensities[J]. Journal of building structures, 2015, 36(S2): 84-91 (in Chinese).

[9] 张健新,戎贤,吴海超. 配置600 MPa级钢筋混凝土框架边节点滞回性能试验研究[J]. 工业建筑, 2017, 47(6): 30-33.
ZHANG Jianxin, RONG Xian, WU Haichao. Experimental research on hysteretic behavior of exterior joints with 600 megapascal reinforced bars[J]. Industrial construction, 2017, 47(6): 30-33 (in Chinese).

[10] 朱爱萍,肖从真,黄小坤. 配置500 MPa纵筋钢筋混凝土框架顶层端节点抗震性能试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2015, 37(4): 12-18.
ZHU Aiping, XIAO Congzhen, HUANG Xiaokun. Seismic behavior of knee joints of RC frame with 500 MPa reinforcement[J]. Journal of civil, architectural & environmental engineering, 2015, 37(4): 12-18 (in Chinese).

[11] 刘晓. 抗震框架中间层中节点梁筋粘结退化性能试验研究

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202303.00384v1

[D]. 重庆:重庆大学,2006.

[12] ALAEE P, LI B. High-strength concrete exterior beam-column joints with high-yield strength steel reinforcements[J]. Engineering structures,2017,145(1):305-321.

[13] HWANG H J,PARK H G,CHOI W S,et al. Cyclic loading test for beam-column connections with 600 MPa (87 ksi) beam flexural reinforcing bars[J]. ACI structural journal,2014,111(4):913-924.

[14] 秦力,尹志强,潘红燕. 高强钢筋梁柱节点梁纵筋粘结滑移有限元分析[J]. 东北电力大学学报,2018,38(2):68-74.
QIN Li, YIN Zhiqiang, PAN Hongyan. Finite element analysis of measured slip of beam reinforcements of high-strength reinforcement beam-column joints[J]. Journal of Northeast Electric Power University,2018,38(2):68-74 (in Chinese).

[15] ALAEE P,LI B. High-strength concrete interior beam-column joints with high-yield-strength steel reinforcements[J]. Journal of structural engineering,2017,143(7):305-321.

[16] GUAN Dongzhi,GUO Zhengxing,JIANG Cheng,et al. Experimental evaluation of precast concrete beam-column connections with high-strength steel rebars[J]. Ksce journal of civil engineering, 2018,30:238-250.

[17] NIWA J,SHAKYA K,MATSUMOTO K,et al. Experimental study on the possibility of using steel fiber-reinforced concrete to reduce conventional rebars in beam-column joints[J]. Journal of materials in civil engineering,2012,24(12):1461-1473.

[18] 王德弘,郑文忠,鞠彦忠,等. 钢纤维活性粉末混凝土梁柱中节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2019,40(3):161-171.
WANG Dehong, ZHENG Wenzhong, JU Yanzhong, et al. Experimental study on seismic behavior of interior steel fiber reinforced rpc beam-column joints[J]. Journal of building structures,2019, 40(3):161-171 (in Chinese).

[19] ABBAS A A,SYED M S M,COTSOVOS D M. Seismic response of steel fibre reinforced concrete beam-column joints[J]. Engineering structures,2014,59:261-283.

[20] LIANG Xingwen,WANG Yingjun,TAO Yi,et al. Seismic performance of fiber-reinforced concrete interior beam-column joints[J]. Engineering structures,2016,126(1):432-445.

[21] 梁兴文,邢朋涛,王英俊. 局部采用纤维增强混凝土梁柱节点抗震性能的数值分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2014,46(2):187-193.
LIANG Xingwen, XING Pengtao, WANG Yingjun. Experimental study on seismic behavior of beam-column joints with fiber-reinforced concrete in joint core and plastic hinge zone of beam and column end[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (natural science edition),2014,46(2):187-193 (in Chinese).

[22] 傅剑平,张川,陈滔,等. 钢筋混凝土抗震框架节点受力机理及轴压比影响的试验研究[J]. 建筑结构学报,2006,27(3):67-77.
FU Jianping,ZHANG Chuan,CHEN Tao,et al. Experimental investigation of shear mechanism and effect of axial-compression ratio on joints in earthquake-resistant reinforced concrete frames[J]. Journal of building structures,2006,27(3):67-77 (in Chinese).

[23] 崔钦淑,杨俊杰,康谷贻. 钢筋混凝土 Z 形截面柱框架节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2012,33(6):86-95.
CUI Qinshu,YANG Junjie,KANG Guyi. Experimental research on seismic behavior of Z-shaped column joints in RC frame[J]. Journal of building structures,2012,33(6):86-95 (in Chinese).

[24] SAGHAFI M H, SHARIATMADAR H. Enhancement of seismic performance of beam-column joint connections using high performance fiber reinforced cementitious composites[J]. Construction and building materials,2018,180(20):665-680.

[25] 张健新,张标,丁传林. HRB600 钢筋钢纤维混凝土梁柱边节点抗震性能试验研究[J]. 土木与环境工程学报,2020,42(4):105-112.
ZHANG Jianxin,ZHANG Biao,DING Chuanlin. Experimental analysis on seismic behavior of steel fiber concrete beam-column exterior joints with HRB600 reinforcement bars[J]. Journal of civil and environmental engineering,2020,42(4):105-112(in Chinese).

[26] ZHANG Jianxin,ZHANG Biao,RONG Xian,et al. Experimental investigation on seismic behaviour of hybrid precast beam-column joints with different connection configurations[J]. Journal of earthquake engineering,2020(8):3123-3147.

[27] 戎贤,张健新,李艳艳. 往复荷载作用下异形柱节点抗震性能改善措施[J]. 工程力学,2015,32(8):58-65.
RONG Xian,ZHANG Jianxin,LI Yanyan. Improvement measure on seismic behavior of joints of specially shaped columns under cycle loading[J]. Engineering mechanics,2015,32(8):58-65 (in Chinese).

[28] ZHANG Jianxin,DING Chuanlin,RONG Xian,et al. Development and experimental investigation of hybrid precast concrete beam-column joints [J]. Engineering structures,2020,219(15):110922.

[29] ZHANG Jianxin,DING Chuanlin,RONG Xian,et al. Experimental seismic study of precast hybrid SFC/RC beam-column connections with different connection details[J]. Engineering structures,2020, 208(1):110295.

[30] RONG Xian,YANG Hongwei,ZHANG Jianxin. Experimental study of precast beam-to-column joints with steel connectors under cyclic loading[J]. Advances in structural engineering,2020,23(13): 2822-2834.

(编辑　张璐)